

# Ingeniería del concreto lanzado reforzado para el sostenimiento de rocas deleznablees en excavaciones subterráneas

Shotcrete strengthened engineering to support of weak rock on underground excavations

Fernando Enrique Toledo Garay<sup>1</sup>, Alfonso Romero Baylon<sup>2</sup> - Elard Felipe León Delgado<sup>3</sup>

RECIBIDO: 23/05/2016 - APROBADO: 30/06/2016

## RESUMEN

El sostenimiento más económico y seguro en túneles y labores mineras hasta ahora aplicado en el Perú, fue el puesto en práctica en la Mina Cobriza, denominado Sot-Fer (nombre puesto por los mineros: debido a la confusión metálica del acero por el hierro) y hasta ahora no difundido en el Perú, por razones desconocidas. Este método de aplicación del concreto armado en túneles y labores mineras, mediante el Gunitado o Shotcrete, es producto del trabajo de investigación, en la mina Cobriza iniciado con la determinación de las cargas de trabajo de las rocas deleznablees constituyentes de los hastiales del gran manto de sulfuros de 25m de potencia con valores de Cu, Ag y Bi. Estas rocas que son pizarras, fueron estudiadas cristalográficamente, llegándose a la conclusión que se cristalizan en el sistema Hexagonal, división Romboédrico, clase Escalenoérideca Hexagonal, forma Romboedro positivo {h0hl}. Cuando el eje ternario del romboedro coincide con el eje vertical del túnel o la rampa, se genera el colapso, al perder el sustento completo de la base; si no sucede este caso, la roca se auto soporta y no requiere sostenimiento, con esta evidencia y la gravedad específica de la pizarra se calcularon las cargas de trabajo de las estructuras de soporte. Sustentado en el ACI 318-81 y en el análisis de estructuras en arcos, presentados en los libros de Timoshenko (Tomo II, pp: 97-109) y Olivera López (pp: 127-139); habiéndose calculado las cargas de trabajo bajo las propuesta de Stagg (pp: 103-124 y 193-222) y Hock (pp: 183-201). El shotcrete reforzado con acero de construcción para la aplicación en ingeniería subterránea es totalmente distinto al NMA (nuevo método austriaco) aplicado con éxito en muchos países del mundo.

Este método de aplicación del concreto armado mediante el shotcrete, es mucho más eficiente, de menor costo y con mayor versatilidad que el NMA para adaptarse a eventuales cambios de la estabilidad de las rocas que se presentan en las operaciones mineras; precisamente en la inmersión del acero dentro de la masa de concreto.

**Palabra Clave:** Gunitado reforzado. Concreto armado lanzado.

## ABSTRACT

The most economic support and secure in tunnels and mining work so far applied in Peru, was implemented in the Cobriza Mina, called Shot-Fer (name given by the miners because metallic confusion of steel by iron) and so far not spread in Peru, for unknown reasons. This application method of reinforced concrete in tunnels and mining operations by gunning or shotcrete, is the result of research work in the Cobriza mine started with determining workloads of the constituent crumbly rocks of the gables of the great mantle 25m sulphide power with values of Cu, Ag and Bi. These rocks are slates, they were studied crystallographically, leading to the conclusion that crystallize in the hexagonal system, rhombohedraal division, class Escaleno erdeica Hexagonal

1 Docentes de Ingeniería de Minas de la Universidad Nacional Mayor San Marcos.  
Teléfono: 6545226, 994416215, 6197000 anexo: 1111. E-mail: fenriquetoledog@hotmail.com

2 Docentes de Ingeniería de Minas de la Universidad Nacional Mayor San Marcos.  
Teléfono: 6545226, 994416215, 6197000 anexo: 1111. E-mail: fenriquetoledog@hotmail.com

3 Docente de Ingeniería Metalúrgica de la Universidad Nacional Mayor de San Marcos.  
Teléfono: 3441128, 991251994, 6197000 anexos: 1110. E-mail: eleond13@hotmail.com

shape {h0hl} Rhombo hedron positive. When the ternary axis of rhombo hedraal coincides with the vertical axis of the tunnel or ramp, the collapse is generated, losing the full support of the base; if this case happens rock self supporting and does not require maintenance, this evidence and the specific gravity of the slate the workloads support structures were calculated. Supported in ACI 318-81 and analysis of structures in arches, presented in the books of Timoshenko (Volume II, pp 97-109) and Olivera Lopez (pp 127-139); workloads having been calculated under the proposal Stagg (pp: 103-124 and 193-222) and Hock (pp 183-201). The steel-reinforced shotcrete construction for use in underground engineering is totally different from the NMA (New Austrian Method) applied successfully in many countries.

This method of application of reinforced concrete by shotcrete, is much more efficient, lower cost and with greater versatility than the NMA to adapt to any changes in the stability of rocks that occur in mining operations; precisely the immersion of steel within the concrete mass.

**Keyword:** Reinforced Concrete Sprayed. Steel assembled shotcrete.

## I. INTRODUCCIÓN

La mina Cobriza, perteneciente al distrito de Coris de la provincia de Churcampa del departamento de Huancavelica, Perú; se ubica en el flanco izquierdo del valle profundo del curso del río Mantaro a 190 Km al S60°E de la ciudad de Huancayo<sup>4</sup>, como se encuentra en el Inventario de Reservas de la Mina Cobriza, firmado Jefe de Geólogos de División, Andrés Rivera en 1984. Este importante yacimiento de cobre, plata y bismuto ocurre en un solo manto calcáreo reemplazado por sulfuros que yace entre dos estratos de pizarras intensamente plegados y fracturados. El manto es una roca muy competente con un RQD de 90 a 100 cuando no están interceptadas por fallas, o simplemente cuando las labores se desarrollan sobre los hastiales deleznable con RQD de 60 a 30, (STAGG.1990). Los problemas de sostenimiento se generan también cuando se desarrollan By-Passes (túneles paralelos a las galerías y rampas) desarrollados sobre los hastiales en pizarra.

La aplicación del concreto o mortero por aspersión, impulsado por la fuerza del aire comprimido, denominado en inglés shotcrete y castellanizado en la industria con este nombre. En Perú se inició a fines de la década de los años 60, perfeccionándose su aplicación a mediados de los 70. A raíz del inicio de los trabajos del proyecto de expansión de la mina Cobriza.

Esta técnica de sostenimiento no fue suficiente para solucionar los problemas que ocasionara la ampliación de la mina como: el mayor tamaño del equipamiento para dotar a la planta concentradora de 2 000 toneladas diarias que se extraía a 10 000 t/día, proyectados para la expansión; por lo tanto, cambiándose la capacidad de las palas LHD con cucharas de 5 yardas cúbicas a 13 yardas cúbica, generándose la ampliación de las secciones transversales de las galerías y las rampas; en general, habiendo crecido las actividades y la envergadura de las operaciones. Así mismo, se tuvo la necesidad de recurrir a otras alternativas de sostenimiento de las labores mineras, como: el uso de arcos de estructuras de acero, luego estos mismos arcos reforzados con concreto armado, los que retrasaron la marcha de las operaciones por su lentitud y altos costos de su ejecución; luego, retornándose a la aplicación del Shotcrete reforzándose con los pernos de roca de diferentes tipos y valores; los que ocasionaron seguidamente algunos accidentes incapacitantes y fatales.

4 RIVERA, A. M. Y OTROS. 1984. Manto Cobriza Apreciaciones de su Forma Zoneamiento y Probables Relaciones con el Modelo Sedimentario. p: 2 - 14. XXII Convención de Geología. Editado por Centromin Perú S.A. La Oroya, Perú.

La necesidad de encontrar la alternativa más segura, eficiente y económica, nos incentivó a investigar la manera de reforzar la resistencia del shotcrete, mediante los parámetros del concreto armado; pero el ACI (Instituto Americano del Concreto) en esos años ni actualmente menciona la manera de ensamblar el acero sin el uso de encofrados, habiéndose logrado este objetivo en Cobriza a mediados de los años 80, este método de actual vigencia no se ha difundido; en cambio, se está aplicando el sostenimiento suspendido con pernos de roca, habiéndose cobrado muchas vidas humanas en su aplicación en muchas minas subterráneas donde se utilizaron.

El diseño del sostenimiento de los hastiales en pizarras, en la mina Cobriza se inició con la determinación de las cargas de trabajo de las rocas deleznable constituyentes de estos hastiales del gran manto de sulfuros de 25m de potencia con valores de Cu, Ag y Bi. Estas rocas metamórficas, fueron estudiadas cristalográficamente, llegándose a concluir que se cristalizaron en el sistema Hexagonal, división Romboédrico, clase Escaleno érdeica Hexagonal, con la forma de Romboedro positivo {h0hl}. Cuando el eje ternario del romboedro coincide con el eje vertical del túnel o la rampa, se genera el colapso, al perder el sustento completo de la base; si no sucede este caso, la roca se auto soporta y no requiere sostenimiento, con esta evidencia y la gravedad específica de la pizarra se calcularon las cargas de trabajo de estructuras de soporte; si el eje ternario del cristal tiende a la horizontalidad, no requiere sostenimiento; con esta evidencia y la gravedad específica de la pizarra se calcularon las cargas de trabajo de las estructuras de soporte, sustentándose estas afirmaciones con las Figuras N°1, N° 2 y N° 3.

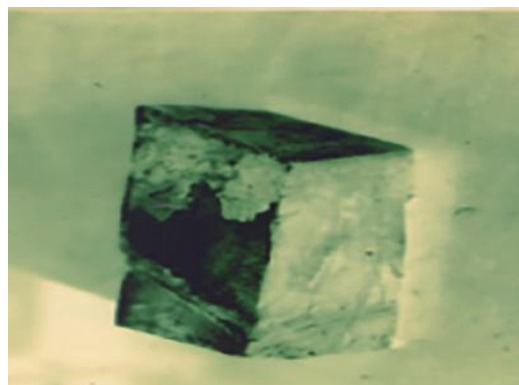


Figura N° 1. Fragmento de la roca Pizarra Cristalizada, nótese en la base el plano de clivaje.

Con estas evidencias y el análisis de la posición el eje ternario cristalográfico, respecto al eje vertical de las galerías y rampas, sustentado en el ACI 318-81 y en el análisis de estructuras en arcos, presentados en los libros de: Resistencia de Materiales<sup>5</sup> y Análisis de Estructuras<sup>6</sup> habiéndose calculado las cargas de trabajo o los lineamientos de la mecánica de rocas y las excavaciones subterráneas, se calculó las dimensiones de la estructura de soporte del concreto armado. El shotcrete reforzado con acero de construcción para la aplicación en ingeniería subterránea es totalmente distinto al NMA (nuevo método austriaco) aplicado con éxito en muchos países del mundo.



Figura N° 2. Roca a punto de colapsar en el techo de la rampa 42-3159. Nótense los planos de clivaje mucho más abiertos.

Las secciones transversales de los túneles y las labores mineras se perforan con dimensiones cada vez mayores, para dar cabida al equipo de gran envergadura montado sobre llantas, para extraer mayor cantidad de mineral y compensar de esta manera sus bajas leyes; esta situación, ha generado mayores problemas de sostenimiento, donde la madera y los arcos de acero cada vez se está haciendo menos usual por su inoperancia, vulnerabilidad a la colisión de las máquinas y la lentitud de su operación en el sostenimiento de los túneles y labores mineras. La mina Cobriza es un yacimiento formado en un sólo manto de sulfuros y silicatos ferro magnesianos, los que fueron reemplazados en calizas, este manto es muy competente; pero las rocas de los hastiales son pizarras, cuya competencia al auto sostenimiento es muy variable, desde mediana hasta incompetente, especialmente cuando las labores atraviesan fallas y cuando es debilitada por la apertura de labores adyacentes. En el desarrollo de las labores en pizarra es imprescindible con fines de acceso al yacimiento y los tajeos de explotación. En esta mina, las labores de desarrollo tienen una sección cuatro metros de altura por seis metros de ancho, los que desde el principio fue sostenido con concreto simple y algunas veces reforzado con malla de alambre; sin embargo, en tramos cercanos a la superficie o adyacentes a otras labores mineras, como tajeos, chimeneas y rampas, este tipo de sostenimiento era insuficiente, colapsando el techo y los flancos de roca

pizarrosa, con el consecuente retaso en las operaciones y generando costos elevados de la producción.



Figura N° 3. Roca con el eje ternario cristalinio tendiente a la horizontalidad muy estabilizada y no requiere sostenimiento a 120m de punto de la fotografía anterior de la misma 42-3159. más abiertos.

En construcciones civiles y en minería, es muy conocido la aplicación del concreto armado y el Shot-creting; inclusive, la aplicación del concreto armado aplicado con el Shotcrete, como el Nuevo Método Austriaco (NMA); sin embargo este método para sostener túneles mineros que tienen una duración temporal, es lento y costoso. En esta investigación, después de analizar las fuerzas actuantes sobre la estructura de soporte y encontrar que la estructura sólo requiere refuerzo para contrarrestar la fuerza cortante entre el arco de medio punto y los "estribos" (flancos verticales del túnel); se ha buscado la manera más rápida, segura y económica de ensamblar el refuerzo metálico, a la aplicación con el Shotcrete.

Proponiéndose para tal fin, la aplicación de la estructura de concreto armado de construcción más rápida, económica y segura para soportar la roca suelta en los desarrollos sobreroca incompetente. Esta Propuesta consiste en reforzar la aplicación del concreto con Shotcrete con acero corrugado de construcción, ensamblándolo en sus calibradores; para que el acero tome los esfuerzos cortantes y el concreto los de compresión.

El método Shot-Fer se justifica por ser seguro durante su ejecución (sin ningún accidente incapacitante ni fatal registrados), de fácil y rápida aplicación (1,80 m/Tarea, en secciones de 4m por 6m y 0,17m de espesor), más económica, en Cobriza a US \$ 355/m (30% menos que el NMA, 16% menos que el shotcrete con bulonado y 63% menos que los arcos de concreto armado con armazón arcos de acero estructural)

La aplicación del shotcrete tiene una vigencia actual (actualizada por la bibliografía vigente) que todavía no se ha superado, pese que en el Perú se inició a fines de la década de los años 60, perfeccionándose su aplicación a mediados de los 70. A raíz del inicio de los trabajos de la expansión de Cobriza, se tuvo la necesidad de investigar la manera de reforzar su resistencia mediante los parámetros del concreto armado; pero el ACI (Instituto Americano del Concreto) en esos años ni actualmente menciona

5 Timoshenco, S. 1962. Resistencia de Materiales, Tomo II, pp: 97- 109, Arco articulado en los extremos. Madrid, España. Editorial Espasa-Calpe.

6 Olivera, L. 1972. Análisis de Estructuras, pp: 105 - 123. Análisis Estructural del Arco. Norgis Editores. México D.F., México.

la manera de ensamblar el acero sin el uso de encofrados, habiéndose logrado este objetivo en Cobriza a mediados de los años 80, este método de actual vigencia no se ha difundido y en su lugar se está aplicando el sostenimiento suspendido con pernos de roca, habiendo cobrado muchas vidas humanas en su aplicación.

### 1.1 Antecedentes

El Shotcrete o Gunitado, es un método de aplicación del concreto simple a superficies naturales (rocas y suelos) y artificiales (estructuras de concreto, acero y mampostería), con diferentes finalidades; lanzándolo con mucha fuerza mediante el aire comprimido para que se adhiera a la superficie lanzada y se compacte. Este procedimiento se efectúa con la ayuda de una maquinaria de lanzamiento fabricada específicamente para este fin. En la actualidad hay tres modalidades de mezcla: seca, la semi húmeda y la húmeda. Para la aplicación en techos de túneles la mezcla seca genera menor cantidad de desperdicios de material por rebote de la mezcla y la semi húmeda, además disminuye la generación del polvo durante la aplicación del shotcrete, la mezcla húmeda genera demasiada cantidad de desperdicios por rebote de la mezcla, especialmente durante la aplicación al techo, superando el 40%.

El espesor de la aplicación del shotcrete está en función del ancho del túnel y no requiere refuerzo metálico si la carga no genera una fuerza cortante de baja magnitud. Cuando aparecían grietas en la aplicación del Shotcrete desde el principio de la aplicación de este método de sostenimiento, se utilizaban refuerzos de malla de alambre y pernos de roca; pero para ejecutar esta operación se tenía que perforar la roca; el hecho de perforar en roca deleznable, ocasionaba graves accidentes incapacitantes y fatales; así como la destrucción del equipo. Todo este caos, debido a la acción disolvente del agua de perforación. El Nuevo Método Austriaco (NMA)<sup>7</sup> es una buena alternativa, precisamente para dejar de usar los pernos de roca en perforaciones de techo, el uso de estos pernos, podría ser una alternativa sin riesgos sólo para casos de perforación de flancos con taladros horizontales o tendientes a la horizontalidad. Pese a la ponderación que hace Rivas de la Riega, este método, también aplicado en la mina Cobriza, es lento, costoso y sobre dimensionado en estructura de acero y concreto, en comparación con el método Shot-Fer; además NMA, es poco versátil para casos en que las características mecánicas de las rocas, varían según las condiciones de ventilación y los factores inherentes a la misma roca.

## II . MÉTODO Y MATERIALES

El método empleado en las investigaciones de ingeniería es sólo el analítico deductivo, en laboratorio o en campo, como en este, siguiendo los siguientes pasos sistemáticos:

- 1°. Estudio y determinación de la característica litológica de los hastiales del manto mineralizado de Cobriza: Génesis, los plegamientos, fallas, sistema de fracturas, planos de clivaje, sistema de cristalización, gravedad específica, de la pizarra para evaluar la carga que podría soportar la estructura de soporte.
- 2°. Con Estudio de los fragmentos, producto de los pequeños colapsos se descubrió los planos de fractura y de clivaje, con los que se determinó el sistema de cristalización, orientando los ángulos de los cristales de roca pizarrosa y efectuando las proyecciones cristalinicas con la utilización de la plantilla estereográfica de Wulff<sup>8</sup> que es de 5 cm de radio y goniómetro de contacto, como se muestra en el libro Dana, en las páginas del 31 al 41 del libro Manual de Mineralogía (Dana – Hurlbut 1960). Al mapearse las fracturas de las rocas, levantadas en los planos, secciones transversales y longitudinales; así como, haciéndolas coincidir con los ejes verticales de las labores, para observar la posición de los planos de disyunción y fracturas; y con esta información.
- 3°. Conociendo el sistema de cristalización, de esta roca metamórfica, se llegó a concluir que se cristalizó en el sistema Hexagonal, división Romboédrico, clase Escaleno érideica Hexagonal, con la forma de Romboedro positivo {h0hl}, como se puede observar en la Figura N° 1, se puede apreciar claramente los planos de clivaje y las características del cristal. En la Figura N° 2 se observa claramente como estos planos incrementan su abertura pasando de planos de disyunción a planos de fractura y listas para colapsar.
- 4°. En el estudio de los colapsos determinó que este fenómeno no ocurre en todas las capas de pizarra; sino sólo cuando el eje ternario del romboedro coincide con el eje vertical del túnel o la rampa. Si el eje ternario del es horizontal o tiende a la horizontalidad la labor se mantiene estable y no requiere estructura de sostenimiento, como se puede apreciar en la Figura N°3. La explicación es simple: al abrir una labor como un crucero o rampa, el eje ternario queda sin sustento, truncado o cortado y por lo tanto todas las capas de la pizarra se exfolian al vacío.
- 5°. Con los flancos de rotura de la roca tangentes a la labor y la gravedad específica, se encontraron las cargas de trabajo que debía soportar la estructura y se estudiaron las fuerzas incidentes en las estructuras de entibación: dirección, sentido e intensidad.
- 6°. Como en la resolución del problema tendríamos más de tres incógnitas, y sólo energía de deformación, basado en el teorema de Castigliano.
- 7°. Con la demostración de este teorema, concluiremos que en la estructura de soporte no tendremos esfuerzos de tracción, sino, solo de compresión que lo tomará el concreto y los esfuerzos cortantes lo tomarán las varillas de acero corrugado de construcción.

7 RIVAS DE LA RIEGA, J.L. 1991. Morteros y Hormigones Projectados, pp: 73-75 y 83-113. Imprime: Artes Gráficas Lillo, S.A.-Alpedrete, 7 .Madrid España.

8 Dana-Hurlbut. 1960. Manual of Mineralogy, pp:31-41. Editorial: John Wiley & Sons, Inc. Nueva York, Estados Unidos de N.A.

- 8°. El siguiente problema surgido, es de qué manera ensamblaremos el acero. Habiendo estudiado este problema se concluyó la peligrosidad que generaría el perforar la roca para ensamblar los tarugos de madera para clavar las grampas de sujeción del acero; desechándose esta posibilidad, se concluyó que sería mucho mejor aplicar una primera capa de Shotcrete de 8 cm de espesor y enseguida sobre escapa ensamblar los alambres de amarre N° 14, ahogados en una masita de cemento con acelerante de fraguado, quedando el alambre de amarre fuertemente pegado a la superficie de shotcrete recientemente aplicado, debido al fraguado casi simultáneo.
- 9° El siguiente turno fijaría, primero la malla de alambre N°8 de 10cmx10cm y debajo de este los arcos de acero corrugado de construcción, a espacios de 45 cm uno de otro, obedeciendo al análisis estructural del concreto armado, como se observa en la Figura N° 4.

### III. RESULTADOS Y DISCUSIONES

#### 3.1 Resultados

Después de haberse efectuado los cálculos de cargas de trabajo de la estructura de soporte, se obtuvo los siguientes resultados:

Ancho o luz de la estructura: 6 m; altura: 4 m; espesor total: 0,17 m; espesor de la primera capa de Shotcrete: 0,08 m = 8 cm; espesor del recubrimiento del refuerzo metálico o segunda capa de Shotcrete: de 0,09 m = 9 cm, para que soporte el roce y colisión de las máquinas.

Características del refuerzo de acero:

$$A_s = N^{\circ} 5, \text{ ó } \phi \frac{5}{8}'' @ 0,45 \text{ m};$$

El acero de construcción será el número 5 o sea de 16 mm de diámetro, colocados debajo de la malla de alambre N° 8 con cocada de 10cm X 10cm.

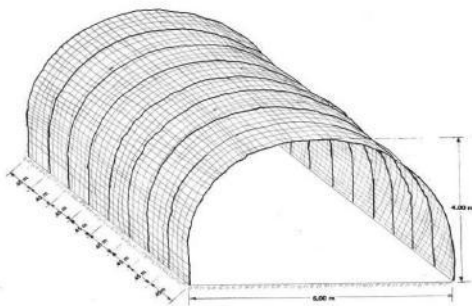


Figura N°4. Disposición Isométrica del Refuerzo Metálico: Mallado alambre N° 8 de 10cmX10cm(Rojo) y Acero corrugado de construcción  $\phi = 5/8''$ (Azul). Escala: 1/100

En la Figura N° 4 se muestra el diseño de refuerzo de acero obtenido de los cálculos del estudio de investigación, pero lo novedoso es el ensamblaje de este refuerzo en las operaciones de Shotcreting, como lo veremos en el diseño de la parte operativa.

Se obtuvo los siguientes resultados para ejecutar la operación; primero, se aplica la primera capa de Shotcrete, que para el caso de Cobriza fue 8 cm, luego se colocan los calibradores de alambre N° 14, espaciados cada 45 cm, hundidos en una masa de cemento con aditivo acelerante (Sika) en la proporción volumétrica de 2 a 1; con estos calibradores se amarra la malla de alambre N° 8 con "cocada" de 10cm X 10cm; de bajo de esta malla de alambre, se amarran las varillas corrugadas de construcción N° 5 o de 16 mm de diámetro ( $\Phi = 5/8''$ ), arqueados y traslapados, figura N° 1; luego se aplica la segunda capa de Shotcrete de 9 cm de espesor, con lo que se logra un espesor total de concreto de 17 cm ó  $6''+11/16''$  para el caso de túneles en roca deleznable de 6 m de ancho por 4 m de altura:  $6m=600cm/35 = 17,14 \text{ cm}$ .

#### 3.2 Discusión

La mina Cobriza es un yacimiento formado por un manto de sulfuros y silicatos ferro magnesianos, los que fueron reemplazados en calizas, este manto es muy competente; pero los hastiales son pizarras, cuya competencia al auto sostenimiento es muy variable, desde mediana hasta incompetente, especialmente cuando las labores atraviesan fallas y cuando son debilitados por la apertura de labores adyacentes. El desarrollo de las labores en pizarra es imprescindible con fines de acceso al yacimiento y los tajeos.

#### 3.3 Comportamiento Mecánico de la Pizarra

Observando el comportamiento mecánico de la pizarra, se determinó que se fractura mediante planos de clivaje, los que se exfolian en perfectos romboedros; cuyo eje ternario gira en el espacio en función al plegamiento de los estratos (Dana, 2008). Cuando la posición del eje ternario del romboedro se encuentra en la vertical y coincide con el eje vertical de la labor, se encuentra en el caso más crítico de carga o sea la estructura soportará mayor peso; y cuando varía en cualquier sentido, irá disminuyendo la carga hasta cuando el eje ternario de romboedro se ponga perpendicular al eje de la labor, o sea horizontal; en este caso, el techo de la labor no requerirá sostenimiento, el techo de la labor será un arco angular natural y no requerirá soporte. Por lo tanto, los cálculos se orientan al caso más crítico. Con este criterio se ha podido evaluar, lográndose calcular y determinar las cargas actuantes en la estructura de soporte.

En el sistema de minado con rampas, no es pertinente emplear la entibación con madera, debido a que el equipo pesado montado sobre llantas, al rozarlas las quita de su lugar y las hace caer.

El sostenimiento suspendido con diferentes pernos de roca, probados en esta mina, tampoco es pertinente ni adecuado; pero además es muy inseguro, se tuvieron muchos accidentes muy dramáticos, con pérdidas de vidas humanas y mutilaciones, así como el destroz del equipo utilizado en estas operaciones. La causa principal de la inoperancia, es que al iniciarse la perforación, el agua del barrido disuelve el polvillo de las intercaras del romboedro, tornándose en una especie de lubricante para hacer caer grandes bloques de roca muy pesada y cortante.

La alternativa más segura y pertinente fue el sostenimiento con concreto armado, como lo aplicaron en el (Bypass) túnel paralelo a la galería del nivel 51. Este sostenimiento con arcos de perfiles de acero y concreto armado vaciado clásicamente en encofrados de madera usando una bomba de concreto, hasta ahora debe ser una súper estructura, digna para utilizarse como refugio de guerra nuclear; pero para una estructura de sostenimiento de mina, donde las labores son muy eventuales, es muy costosa y de ejecución lenta.

El Shotcrete, es la aplicación del concreto por aspersión, con el auxilio del aire comprimido mediante máquinas diseñadas por ingenieros de minas con esta finalidad, de manera que se pueda obviar el vaciado en encofrados y esperar que el concreto fragüe para sacar las tablas de madera, haciéndose muy lenta su aplicación. También se podrían aplicar Dovelas, que también son arcos de concreto armado prefabricados, se tiene el inconveniente de que para el transporte, la instalación y su estabilización se requiere del adecuado equipo que eleva los costos y la lentitud de la operación es muy considerable.

La resistencia del Shotcrete es muy limitada como cualquier concreto simple, se puede obtener una resistencia a la compresión de 250 kg/cm<sup>2</sup>, o más, como se puede observar en la tabla N°1; pero cuando actúan fuerzas de tracción y corte, sus esfuerzos llegarían sólo: a la tensión 7,1 kg/cm<sup>2</sup> y al corte 4,9 kg/cm<sup>2</sup>; por lo tanto se requiere el refuerzo metálico. Para el caso de labores mineras, en la zona del arco donde se pueden presentar las fuerzas cortantes, al generarse el deslizamiento de los fragmentos de roca del techo sobre los flancos estables dentro de la forma parabólica del arco (Olivera López, Alfonso 2007).

En Europa con este criterio se inventó el nuevo método austriaco (NMA), consistente en preparar estructuras de acero corrugado de construcción, a semejanza de una estructura para columnas, que también se probó en la mina Cobriza, pero su ejecución fue menos lenta que las estructuras reforzadas con perfiles de arcos de acero. La mina requería un método de aplicación mucho más rápida y menos costosa, por lo cual se procedió a investigar en base a un marco teórico muy amplio y se obtuvo los parámetros para la ejecución del Sot-Fer, que consiste en la aplicación de una primera capa de Shotcrete de 8 cm, luego se procedió al ensamblaje de los calibradores sólo pegándolos con aditivo acelerante (Sika) y cemento puro, para adherir sobre la superficie cementada la malla de alambre y sobre esta el refuerzo de acero corrugado de construcción N°5 (5/8") como se ve en la Figura N°4; finalmente se aplicó otra segunda capa de Shotcrete de 9 cm hasta que el refuerzo metálico quede totalmente dentro del concreto.

### 3.4 Criterios para el Análisis de Estructuras

Se puede aplicar dos criterios para analizar y calcular las estructuras de concreto armado aplicados con el método Shot-Fer como son:

#### 3.4.1 Criterio del Arco Parabólico

Si la labor tiene una sección semejante a un arco parabólico y no se han encontrado fallas que podrían deformar la sección, se aplicará el análisis de la estructura de un arco parabólico hiperestático articulado en los apoyos. Aplicando el segundo teorema de Castigliano para encontrar la intensidad, dirección y sentido de las reacciones, mediante la energía de deformación; se demuestra que estos arcos tienen un momento de flexión igual a cero quedando las fuerzas cortantes ubicados en ambas intersecciones del arco de medio punto con sus respectivos "estribos" (flancos verticales de la labor).

#### 3.4.2 Criterio de Pórticos

El caso de que la sección de la rampa o el túnel haya sido deformada, se empleará el criterio de los pórticos cargados en la Trabe y los Postes, según cada caso presentado en un determinado tramo de una labor minera. Como las condiciones son muy diversas y cada caso requiere un cálculo peculiar, no lo desarrollaremos como ejemplo, ya que el problema consistirá sólo en calcular y graficar el diagrama de los momentos de flexión y de corte para cada caso particular y aplicar el cálculo de vigas y columnas de concreto armado.

#### 3.4.3 Cálculo de las Cargas Aplicadas a la Estructura

Para determinar las cargas actuantes en la estructura de soporte a la roca excavada o su comportamiento mecánico, se dibuja la sección transversal de diseño en líneas punteadas; sobre esta línea se dibuja, el promedio de las secciones transversales, medidas con cinta de lona a distancias constantes obteniéndose una línea sinuosa tangente a la sección de diseño, de 6 m de ancho ( $a = 6$  m) y 4 m de altura ( $h = 4$  m); el radio de curvatura del techo es de 3 m ( $R = 3$  m =  $a/2$ ). Las partes rectas laterales del túnel o la rampa es de 1 m ( $h' = h - R = 4$  m -  $3$  m =  $1$  m); la línea continua sinuosa es la sección real de la labor, debido a la sobre rotura de las explosiones en su avance. Siendo ( $p'$ ) la distancia perimetral entre los puntos de apoyo del arco, denominado perímetro de diseño o intrado del arco (distancia perimetral menos el ancho de la labor) y ( $p$ ) la distancia sinuosa (distancia perimetral real menos el ancho de la labor), denominado el perímetro real o extrado del arco, también de recubrimiento con Shotcrete,  $p =$

$(\delta) p'$ , siendo  $\delta$  el exceso del contorno real respecto a lo diseñado, obtenido del promedio de mediciones del contorno con cinta de lona, medido cada 50 m en eje de la labor; obteniéndose la siguiente expresión matemática para el cálculo estructural y el de materiales:

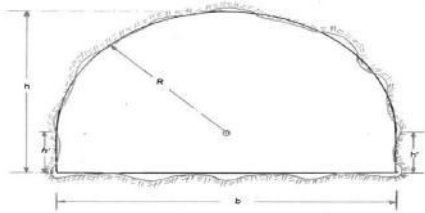


Figura N° 5. Sección transversal real del túnel sobre la sección de diseño, con sus respectivas dimensiones. Escala 1/50

$$h = 4 \text{ m}; b = 6 \text{ m}; h' = h - R; R = b/2$$

$$p' = \pi R + 2h' = \pi \left( \frac{b}{2} \right) + 2 \left( h - \frac{b}{2} \right) =$$

$$2h + \frac{b}{2} (\pi - 2) = 2h + \frac{b}{2} (3,1416 - 2) =$$

$$2h + 0,5708(b)$$

Reemplazando valores:

para  $b = 6\text{m}$ ;  $h = 4\text{m}$  y:  $\delta = 1,25$

$$p = (1,25)[2(4) + 0,5708(6)] = 14,28$$

$$1,25(8 + 3,4248) = 1,25(11,4248) =$$

$$p = 14,28 \text{ m}$$

Tangente al contorno sinuoso de la labor se dibuja un fragmento de pizarra según los planos de partición o de clivaje romboédrico, para representar la inestabilidad. Mediante el planímetro o aplicando geometría plana elemental, se calculan por separado las áreas achuradas (potenciales áreas de desprendimiento de la roca) en el techo y los costados de la labor, estas áreas se multiplican por una unidad de longitud, que para el caso del Shot-Fer se multiplicó por 0,45 m debido a que esta longitud es el espaciamiento ( $s = 0,45 \text{ m}$ ) del refuerzo metálico lo mismo que el ancho de la losa ( $s = 0,45 \text{ m}$ ).

Respecto a la figura N° 5, tenemos:

$$\text{Área del Techo} = 6,330\text{m}^2$$

$$\text{Áreas laterales} = 1,191 \text{ m}^2$$

Cálculo del peso de los Prismas por unidad de longitud:

$$\text{Techo} = P_T = 6\,330 \times 0,45 = 2\,848,50 \text{ m}^3$$

$$\text{Laterales} = P_{LA} = 1\,191 \times 0,45 = 536,95 \text{ m}^3$$

Peso de los prismas:

Siendo el peso específico de la pizarra de Cobriza  $P_e = 3,00 \text{ t/m}^3$

$$\text{Carga en el techo} = P_T = 2\,848,5 \times 3 = 8\,545,50 \text{ kg}$$

$$\text{Cargas laterales} = P_{LA} = P_{LB} = (536) 3 (\text{sen } 55^\circ) = (536) 3 (0,81915204) = 1\,317 \text{ kg.}$$

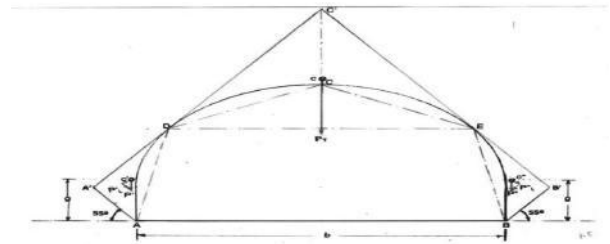


Figura N° 6. Triángulos de cargas en equilibrio Escala geométrica: 1/50

Escala de fuerzas: 5 mm = 1t

$$b = 6,00 \text{ m}; h = 4,00 \text{ m}; c'A = c''B = 1,45 \text{ m}$$

$$P_T = 8,24 \text{ t}; P'_L = P''_L = 1,317 \text{ t}$$

L = luz de la losa que es igual a (b):  $L = b = 6 \text{ m}$

### 3.4.4 Calculando la Carga Uniformemente Repartida Sobre el Arco

Sabemos que para un arco de 6m de luz o ancho de labor y 4m. de flecha (f) o altura de labor el perímetro de diseño  $p'$  es igual a 11,42 m, siendo este el intrado del arco y el perímetro real o rugoso  $p$  es igual a 14,28, el extrado del arco.

Entonces la carga muerta por sobrecarga de la pizarra será:

$$W_1 = \frac{P_T + 2(P_L)}{p'} = \frac{8,546 + 2(1,317)}{11,42} =$$

$$W_1 = \frac{11,180}{11,42} = 0,9789 \text{ t/m}$$

### 3.4.5. Calculo del Peso Propio de la Losa

Esta carga se calcula multiplicando el espesor de la losa:

$$e = \frac{L}{35} = 0,17\text{m}$$

por el espaciamiento:

( $s = 0,45$ ) del refuerzo metálico y por el peso específico del concreto ( $P_e = 2,40$ ), como:

$$W_2 = 0,17 \times 0,45 \times 2,40 = 0,1836 \text{ t/m}$$

### 3.4.5 Carga Total

Es la suma de estas dos cargas:

$$W' = W_1 + W_2 = 0,9789 + 0,1836 = 1,1625 \text{ t/m}$$

### 3.4.6. Carga de Diseño

Considerando que esta carga total sufrirá perturbaciones dinámicas debido a filtraciones de agua y las vibraciones de los disparos; incrementándose en un 50%:

$$W = 1,744 \text{ t. /m}$$

La carga de diseño es la fuerza uniformemente repartida para calcular las dimensiones de la estructura, ésta es la suma de la carga muerta ( $W'$ ) o peso muerto por unidad de longitud en el intrado del arco, más las cargas dinámicas ( $W''$ ), causadas por la vibración de los disparos y las filtraciones de agua; que para este caso se ha considerado el 50% de la carga muerta ( $W'' = 0,50 W'$ ):

$$W = W' + W'' = W' + 0,50 W' = 1,50 W' = 1,50 (1,1625) = 1,744 \text{ t/m.}$$

**3.5 Análisis Estructural del Arco**

Para calcular la estructura de concreto armado, se requiere encontrar la máxima fuerza cortante ( $V_u$ ) y la máxima carga axial ( $N_u$ ); para lo cual debemos encontrar antes los componentes verticales  $V_A$  y  $V_B$ ; así como, las componentes horizontales  $H_A$  y  $H_B$  en cada uno de los apoyos del arco.

Como esta estructura es hiperestática, las componentes horizontales y verticales de las reacciones en los apoyos:  $H_A, H_B, V_A, V_B$ . Vemos que las incógnitas son cuatro; por lo tanto, también las ecuaciones tienen que ser cuatro.

**3.5.1 Carga de Diseño**

Considerando que esta carga total sufrirá perturbaciones dinámicas debido a filtraciones de agua y las vibraciones de los disparos; incrementándose en un 50%:

$$W = 1.744 \text{ t. /m}$$

La carga de diseño es la fuerza uniformemente repartida para calcular las dimensiones de la estructura, ésta es la suma de la carga muerta ( $W'$ ) o peso muerto por unidad de longitud en el intrado del arco, más las cargas dinámicas ( $W''$ ), causadas por la vibración de los disparos y las filtraciones de agua; que para este caso se ha considerado el 50% de la carga muerta ( $W'' = 0,50 W'$ ):

$$W = W' + W'' = W' + 0,50 W' = 1,50 W' = 1,50 (1,1625) = 1,744 \text{ t/m.}$$

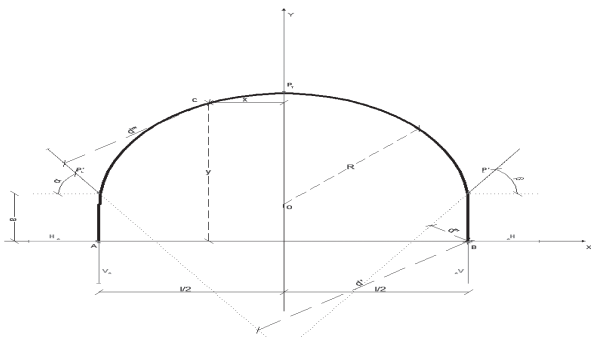


Figura N° 7. Cargas concentradas sobre el túnel.

Escala geométrica: 1/100;

Escala de fuerzas: 5 mm = 1 t

Como esta estructura es hiperestática, las componentes horizontales y verticales de las reacciones en los apoyos:  $H_A, H_B, V_A, V_B$ . Vemos que las incógnitas son cuatro; por lo tanto, también las ecuaciones tienen que ser cuatro:

$$\sum F_x = 0$$

$$H_A + H_B + P'_L \cos 55^\circ - P''_L \cos 55^\circ = 0;$$

$$H_A + H_B = 0$$

$$H_A = -H_B \dots \dots \dots (1)$$

$$\sum F_y = 0$$

$$V_A + V_B - P_T - P'_L \text{ sen } 55^\circ - P''_L \text{ sen } 55^\circ = 0$$

Reemplazando términos y resolviendo:

$$V_B = 10,703 - V_A$$

$$V_B = P_T + 2 (P_L \text{ sen } 55^\circ) - V_A$$

$$V_B = 8,545 + 2 [ 1,317 (0,8192) ] - V_A \dots \dots \dots (2)$$

3ª Ecuación: suma de momentos respecto al punto B del apoyo del arco, referido a la figura N° 6; en este caso, los brazos de momentos  $d' = 4,40 \text{ m}$  y  $d'' = 0,30 \text{ m}$ , se midieron con el escalímetro en el plano de la referida figura N° 4:

$$\sum M = 0$$

$$V_A (L) - P_T \left( \frac{L}{2} \right) - P'(d') - P''(d'') = 0$$

$$V_A = \frac{8,545(3,00) + 1,317(4.40) + 1,317(0,30)}{6,00}$$

$$V_A = 5,31 \text{ t} \dots \dots \dots (3)$$

$$V_B = 5,39 \text{ t} \dots \dots \dots (4)$$

4ª Ecuación: se obtiene aplicando el segundo teorema de Castigliano que dice: "La derivada parcial, con respecto a una carga de trabajo de deformación ( $U$ ), producido por un sistema de cargas del cual forma parte la carga que se trata

$$H_A \text{ es igual a cero: } \frac{dU}{dH_A} = 0$$

Vemos como en la Figura N° 5, que si analizamos el arco parabólico en las coordenadas de un punto, o cualquier otro punto tendremos, aplicando la ecuación de la parábola,

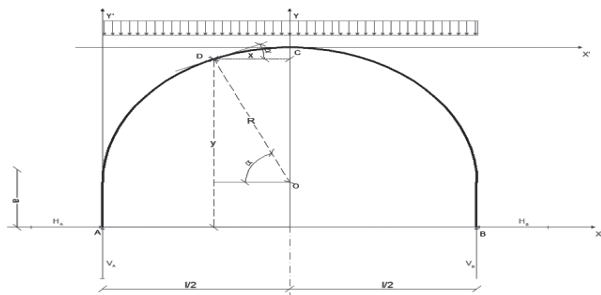


Figura N°8. Cargas uniformemente repartida sobre el túnel.



Escala geométrica: 1/100;

Escala de fuerzas: 5mm = 1 t

$$(X_1)^2 = K(Y_1)^2 \dots\dots\dots(5):$$

En el eje del arco tendremos:

$$X_1 = \frac{L}{2}; \quad Y_1' = f; \quad K = \frac{L^2}{4f}$$

Reemplazando X' y K en la ecuación (2) tendremos:

$$\left(\frac{L}{2} - X\right)^2 = \frac{L^2}{4f}(Y) \quad \text{Despejando (Y) tendremos}$$

$$Y = 4f\left(\frac{X}{L} - \frac{X^2}{L^2}\right); \text{Entonces:}$$

Tomando el momento estático respecto a la luz del arco, que es el de flexión producida por las fuerzas que se encuentran a la izquierda del punto (E) o el eje del arco obtenemos la ecuación (6):

$$M_{est} = W\left(\frac{l}{2}\right)(X) = \frac{WX^2}{2}; \dots\dots\dots(6)$$

El trabajo producido por la deformación es:

$$U = \int_A^B \frac{M^2 ds}{EI} = 0; \dots\dots\dots(7)$$

Reemplazando la ecuación (5) en la (1), tenemos:

$$\frac{dU}{dH_A} = \int_A^B \frac{M \partial}{EI dH_A} = 0; \dots\dots\dots(8)$$

Tomando momentos respecto al punto (C) del arco tendremos:

$$M_E = H_A Y - M_{est.}; \dots\dots\dots(9)$$

Reemplazando (7) en (6)

$$\frac{dU}{dH_A} = H_A \int_A^B Y^2 ds + \int_A^B M_{est.} Y ds = 0; \dots\dots(10)$$

$$\text{Puesto que: } \frac{\partial M}{\partial H_A} = Y; \dots\dots\dots(11)$$

Despejando obtenemos:

$$H_A = \frac{\int_A^B M_{est.} Y ds}{\int_A^B Y^2 ds}; \dots\dots\dots(12)$$

$$\text{Como: } H_A = H_B = H$$

Reemplazamos ésta expresión en la ecuación (10) yobtenemos:

$$H = \frac{\int_A^B \left(\frac{WL}{2} X - \frac{WX^2}{2}\right) 4f\left(\frac{X}{L} - \frac{X^2}{L^2}\right) dX}{\int_A^B 4f\left(\frac{X}{L} - \frac{X^2}{L^2}\right)^2 dX} \quad (13)$$

Resolviendo y reemplazando términos:

$$M_X = \frac{WL}{2} X - \frac{WX^2}{2} - \frac{WL^2}{8f} \left(4f \frac{X}{L} - \frac{X^2}{L^2}\right)$$

$$M_X = \frac{WLX}{2} - \frac{WX^2}{2} - \frac{WLX}{2} + \frac{WL^2}{2} = 0 \dots\dots(14)$$

Esta ecuación (14) demuestra que en el arco no hay momento de flexión. La estructura quedará solamente sujeta a cargas axial (N<sub>D</sub>) y cortante (V<sub>D</sub>).

**3.6 Determinación de cargas axiales**

Para determinar éstas cargas bastará multiplicar la suma de las cargas verticales por el seno del ángulo  $\alpha$  y la componente horizontal de la reacción por el coseno del mismo ángulo, correspondiente al punto de estudio, así tendremos:

**3.6.1. Cargas axiales en un determinado punto (D):**

Después de haberse efectuado los cálculos de cargas de trabajo de la estructura de soporte, se obtuvo los siguientes resultados:

Ancho o luz de la estructura: 6 m; altura: 4 m; espesor total: 0,17 m; espesor de la primera capa de Shotcrete: 0,08 m = 8 cm; espesor del recubrimiento del refuerzo metálico o segunda capa de Shotcrete: de 0,09 m = 9 cm, para que soporte el roce y colisión de las máquinas.

Características del refuerzo de acero: el acero de construcción será el número 5 o sea de 16 mm de diámetro, colocados debajo de la malla de alambre N° 8 con cocada de 10cm X 10cm.

Figura N°1. Disposición Isométrica del Refuerzo Metálico: Mallade alambre N° 8 de10cmX10cm(Rojo) y Acero corrugado de construcción  $\phi = 5/8''$  (Azul). Escala: 1/100

En la figura N° 1 se muestra el diseño de refuerzo de acero obtenido de los cálculos del estudio de investigación, pero lo novedoso es el ensamblaje de este refuerzo

$$\text{Para: } X = 0,45 \text{ m y } \alpha = 45^\circ$$

seno  $45^\circ = 0,7071$  y  $\cos 45^\circ = 0,7071$

$$N_D = W \left( \frac{L}{2} - X \right) \text{seno}\alpha + H_A \text{cos}\alpha$$

$$N_u = 1,744 \left( \frac{6}{2} - 0 \right) 1 + 1,962(0) = 5 \quad 232 \text{ kg}$$

$$N_D = 4,532 \text{ t}$$

Cuando  $N_D = H_A$ ; el punto (D) se encuentra en el apoyo, entonces:  $X = 0$   $\alpha = 90^\circ$

$$N_u = 1,744 \left( \frac{6}{2} - 0 \right) 1 + 1,962(0) = 5 \quad 232 \text{ kg}$$

### 3.6.2 Determinado de la fuerza cortante

Para calcular éstas fuerzas bastará multiplicar la suma de las cargas verticales por el coseno del ángulo  $\alpha$  y las componentes horizontales de la reacción por el seno del mismo ángulo, correspondiente al punto de estudio (D), así tendremos:

$$V_D = \left( \frac{WL}{2} - WX \right) \text{Cos}\alpha + H_A \text{sen}\alpha$$

Se llega a calcular la máxima fuerza cortante )en un punto tal que:  $X = 0,45$  m y  $\alpha = 45^\circ$

$$V_D = 1,744 \left( \frac{6}{2} - 0,45 \right) 0,7071 + 1,962(0,7071)$$

$$V_D = 4,532 \text{ t} = 4 \quad 532 \text{ kg}$$

La máxima fuerza cortante  $V_u$  está a  $45^\circ$  del foco, respecto a la horizontal, con esta fuerza se efectuará el diseño.

$$V_D = V_u; \rightarrow V_u = 4 \quad 532 \text{ kg}$$

### 3.6.3 Diseño del concreto armado

Para el cálculo de estructuras de concreto se ha utilizado los lineamientos de ACI Code 318 - 81, expuestos en libro de Harry Parker y las proporciones de mezcla recomendados en las Tablas 1 y 2 extraídos del libro de Rivas de la Riega; para lo cual se detalla continuación:

Los cálculos se inician con el diseño de la mezcla de agregados, luego con el dimensionamiento de la losa y el refuerzo metálico.

Con fuerzas calculadas:

$$V_n = 5 \quad 223 \text{ kg y } V_u = 4 \quad 532 \text{ kg}$$

Se puede entrar en las fórmulas del ACI considerando que:

$$e = \frac{\text{claro}}{35} = \frac{600\text{cm}}{35} = 17\text{cm}$$

Siendo:  $d = e - i = 17 - 5 = 12$  cm.

$i = 5$  cm recomendado por el ACI para el recubrimiento, pero para proteger del rozamiento de las máquinas incrementaremos a 9 cm durante la ejecución. Si:  $s = b$

o sea espaciamiento = ancho de losa

$$s = b = 0,45 \text{ m.} = 45 \text{ cm.}$$

$A_g =$  Área transversal de la losa

$$A_g = b(e) = 45 \times 17 = 765 \text{ cm}^2$$

Formulas A.C.I. 318 para Cascarones de concreto: esfuerzo de corte que toma el concreto:

$$v_c = 0,50 \sqrt{f'_c} (1 + 0,007) \frac{N_u}{A_g}$$

Reemplazando términos tenemos:

$$v_c = 0,5 \sqrt{280} \left( 1 + 0,007 \frac{5 \quad 232}{756} \right) = 8,77 \text{ kg/cm}^2$$

$$v_c = 8,77 \text{ kg/cm}^2$$

- 1) Esfuerzo de corte que toma la estructura siendo  $\Psi = 0,7$  el factor de reducción de capacidad de carga para cascarones:

$$v_u = \frac{V_u}{\psi(b)(d)} = \frac{4 \quad 532}{0,7(45)(12)} = 12 \text{ kg/cm}^2$$

- 2). Calculando el área de refuerzo metálico:

$$A_s = \frac{(v_u - v_c)(b)(s)}{f_y} = \frac{(12,00 - 8,77)(45)(45)}{2,800} =$$

$$A_s = 2,34 \text{ cm}^2$$

### 3.6.4 Cálculo de las dimensiones de la losa

La losa tendrá la misma longitud del espaciamiento entre los aceros de refuerzas, la luz será la misma que el ancho del túnel o la rampa, pero el espesor mínimo de la losa, será la suma de la primera capa de aplicación de shotcrete que debe soportar sólo su peso propio: que de acuerdo al reglamento A.C.I., es:  $e = \text{luz} / 35 = 600 \text{ cm} / 35 = 17,14$  cm. El arco de una excavación subterránea se mantiene estable mientras el intemperismo, con el oxígeno y el agua no inicien su acción desestabilizadora, de convertir los planos de disyunción en planos de fractura, perdiendo masa por la reacción con el oxígeno con alguno de los elementos componentes de la roca o la acción disolvente del agua infiltrado en estado de vapor; precisamente el shotcrete se inventó como aislante de la roca a la acción del intemperismo, se calcula este espesor mínimo, porque la capacidad portante a la acción de la fuerza cortante lo tomará el acero corrugado de construcción; por este motivo se aplica una primera capa de 12 cm., un poco menos que 5". El segundo paso en el siguiente turno (guardia), se

procederá a la impregnación de los calibradores, alambre N° 14 de 1m de longitud, espaciados a 45 cm tanto transversal como longitudinalmente, ahogando por la mitad estos alambres en una mezcla de cemento con acelerante de fraguado al 12% en peso y agua 23 litros por saco de cemento. El tercer paso es el ensamblado de la malla de alambre N°8 con cocada cuadrada de 10 cm de lado y unidos con electro soldado. El cuarto paso realizado en el mismo turno es el ensamblado de los arcos de varillas de acero corrugado de construcción N°5 (5/8") espaciados cada 45cm, con traslapes de 2 m cm por cada varilla de 9,15 m para formar en cada arco. El quinto y último paso es el recubrimiento con la segunda capa de shotcrete, recubriendo totalmente todo el refuerzo metálico, con un espesor mínimo de 5 cm, de manera que no aparezcan ni siquiera las estrías recubiertas del refuerzo metálico, que sería vulnerable al removido por el rozamiento de las máquinas montadas sobre llantas.

En la figura N° 1; se puede apreciar la disposición de todo el refuerzo metálico lista para la aplicación de plica la segunda capa de Shotcrete de 5 cm de espesor, con lo que se logra un espesor total de concreto de 17 cm.

### 3.6.5 Cálculo de las dimensiones del refuerzo metálico de la losa de concreto armado

A) Buscando los diámetros requeridos del refuerzo metálico:

La malla de alambre # 8 en 45 cm tiene 5 fibras de 0,13 cm<sup>2</sup> de área transversal cada uno, entonces:

$$As, \text{ de la malla de alambre} = 5(0,13) = 0,65 \text{ cm}^2$$

$$As, \text{ de la varilla de refuerzo} = 2,38 - 0,65 = 1,68 \text{ cm}^2$$

$$\text{Varilla N}^\circ 5 \text{ tiene: } As = 2,00 \text{ cm}^2, \phi = 5/8''$$

$$\text{Varilla N}^\circ 4 \text{ tiene: } As = 1,29 \text{ cm}^2, \phi = 1/2''$$

Se debe escoger el mayor:

$$1 \text{ varilla N}^\circ 5 \text{ de } \phi 5/8'' @ 45 \text{ cm.}$$

$$\text{Total } As = 2,00 + 0,65 = 2,65 \text{ cm}^2$$

B) Cálculo del traslape del acero corrugado:

$$t = 30(\phi) = 30 \times 1,6 = 48 \text{ cm}$$

5) Cálculo el recubrimiento o la segunda capa de shotcrete:

$$i = 2\phi + 5,8 = 2(1,6) + 5,8 = 3,2 \text{ cm.} + 5,8 = 9$$

## IV. CONCLUSIONES

1. El Shotcrete reforzado con acero de construcción o Shot-Fer es un método de sostenimiento seguro, aplicable en labores subterráneas de secciones transversales tanto pequeña 2,50mx2,50m como mayores 4mx6m sección transversal y puede soportar cargas tanto como un arco de concreto armado con alma de acero estructural reforzado con acero de construcción y concreto vaciado por métodos tradicionales (con encofrados), dependiendo de las condiciones de diseño para cada caso.
2. El método Shot-Fer permite reparar y reforzar la estructura de soporte, cuantas veces aparezcan fisuras en la losa, aplicando capas superpuestas de

refuerzo metálico y Shotcrete, si en los cálculos no se consideraron parámetros de causas naturales de difícil evaluación.

3. El método Soht-Fer se aplicó en la mina Cobriza cotidianamente en tres frentes de desarrollo en pizarra a la vez, con resultados óptimos desde el punto de vista estructural y económico, habiéndose ahorrado 16 millones de dólares en sostenimiento, durante el proyecto de expansión; pero el mayor logro fue el no haber registrado, ni siquiera accidentes triviales, mucho menos accidentes incapacitantes; inclusive para pasar y sostener labores derrumbadas, dando la posibilidad de cumplir con los objetivos de producción.
4. El método Shot-Fer tiene las siguientes ventajas sobre el Shotcrete combinado con el bulonado con diferentes pernos de roca: jamás ha registrado accidentes fatales por no requerir la perforación en rocas deleznable para la colocación de pernos de roca; es 20% más barato que el Shotcrete bulonado por metro lineal de avance, no requiere de máquinas costosas y perforadoras como en el bulonado.
5. El método Shot-Fer tiene las siguientes ventajas sobre los arcos de concreto armado vaciado en encofrados en arcos de acero estructural: es de fácil y rápida ejecución; se utiliza menor cantidad de equipo, personal, herramientas y materiales por metro de avance, no requiere de bomba de concreto, no requiere de desquinces adicionales para ampliar la sección a fin de introducir los arcos de perfiles estructurales de acero, la acción portante del Shot-Fer es inmediata; por todo esto, los arcos de concreto vaciado cuesta 2,7 veces más que el Shot-Fer.
6. El método Shot-Fer tiene los siguientes inconvenientes: se requiere de una máquina de aplicación de Shotcrete y el lugar de trabajo requiere de regular a buena ventilación, como debe ser en una mina bien organizada.
7. La aplicación de Shot-Fer es recomendable para estabilizar y sostener cualquier tipo de roca deleznable, tanto en la apertura de nuevas labores como para pasar y sostener derrumbes.

## V. AGRADECIMIENTOS

Inicio mi agradecimiento a los lectores de este artículo científico, anunciándoles que la en segunda parte de este trabajo, trataremos sobre las operaciones de aplicación del ShotFer en el campo ilustrados con muchas fotografía de las operaciones: Así mis mismas reconocidos agradecimientos a la memoria de mi buen amigo John Brodley y los ingenieros Juan Guardia Vega y Benjamín Jaramillo Molina, por haber hecho cumplir fielmente en la operaciones de la mina de Coriza, los parámetros de mi investigación y diseño; así como al señor Pablo López quien con mucho entusiasmo abasteció los insumos y supervisó fielmente de acuerdo a las indicaciones impartidas, al ingeniero Elard Felipe León Delgado profesor de siderurgia de la EAP Metalúrgica de la UNMSM, por haberme colmado con los conocimientos en estructuras de acero.

También van mis reconocimientos al Mg. Ing. Daniel Florencio Lovera Director del Instituto de Investigación de la FIGMMG, al vicerrectorado de Investigación que a través del Consejo Superior de Investigación ha dado las pautas para mejorar las publicaciones.

## VI. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Hock, E. and Rown, E.T.(1997).Underground Excavation in Rock. The Institution of Mine and Metallurgy, London, England, Chapter 7, pp: 183-201.
2. Olivera, A. (1972). Análisis de Estructuras, pp: 105 – 123. Análisis Estructural del Arco. Norgis Editores. México, México.
3. Parker, H. and Ambrose, J. (2009). Diseño Simplificado de Concreto Reforzado. Edición Preparada por: J. Ambrose. Editorial Limusa, S.A., de C.V. México D.F., pp: 55 – 172.
4. Rivas, J.L. (1991). Morteros y Hormigones Proyectados. Imprime: Artes Gráficas Lillo, S.A.-Alpedrete,7 .Madrid España. pp: 73 -75 y 83 -113.
5. Rivera, A.M.(1984). Manto Cobriza Apreciaciones de su Forma Zoneamiento y Probables Relaciones con el Modelo Sedimentario. XXII Convención de Geología. Editado por Centromín Perú S.A. La Oroya, Perú. pp: 2 - 14.
6. Stag. K.G. y Zienkieiewicz, O.C .(1968). Rock Mechanics in Engineering Practice, Chapter IV: pp: 103-124 y 193-222, and Chapter VI: pp: 183-201. London, England. John Wiley & Sons.
7. Timoshenko, S. (1962). Resistencia de Materiales. Tomo II. Arco articulado en los extremos. Editorial Espasa-Calpe. S.A. Madrid, España.